

도시폐기물의 강도특성 향상을 위한 현탁액 주입의 응용

Application of Particulate Grouts for Improving Strength
Characteristics of Municipal Wastes

친 병 식*1
Chun, Byung-Sik
박 흥 규*2
Park, Heung-Gyu
장 연 수*3
Jang, Yeon-Soo

Abstract

This paper presents the results of the geotechnical investigation and settlement analysis of a finished waste landfill to find the possibility of the site as a construction area. Also, the variations of the strength of the municipal waste after mixing with the several types of the particulate grouts are investigated. The materials of the grouts used in the experiment are Quick Lime, Portland Cement, Slag Cement and Geocrete Cement.

The results of the geotechnical investigation show that the maximum dry unit weight of the waste becomes lower and optimum moisture content higher as the age of the disposed waste is younger and the organic content is higher. The thickness of the predicted differential settlements of the waste fill has large difference from location to location and the unconfined compression strength of the grout mixed waste from the experiment was higher in the order of Geocrete Cement, Slag Cement, Portland Cement and Quick Lime.

요 지

본 논문에는 사용종료된 쓰레기 매립장의 건설부지로의 개발가능성을 알아 보기 위하여 지반 조사와 침하해석을 수행한 결과를 나타내었다. 쓰레기 폐기물의 침하특성을 저감하고 강도특성을 향상하기 위하여 생석회와 시멘트 계통 그라우트재를 혼합 그 특성변화를 분석하였으며 대상 약액으로는 생석회, 보통시멘트, 슬래그시멘트, Geocrete시멘트의 4종류가 사용되었다.

현장지반조사 결과 쓰레기의 매립기간이 짧아 유기질 함량이 큰 쓰레기가 매립기간이 긴 쓰레기에 비교하여 최적함수비는 크고 최대건조밀도가 작은 것으로 나타났다. 매립쓰레기의 두께가 지점별로 큰 차이를 보였으며 침하량 분석 결과 위치에 따른 침하량의 차이가 크게 나타났다. 고

*1 성희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 성희원, 관동대학교 이공대학 토목공학과 교수

*3 성희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 조교수

결공법의 적용성을 검토한 결과 쓰레기 강도의 향상정도는 Geocrete시멘트, 슬래그시멘트, 보통포틀랜드시멘트, 생석회의 순으로 우수한 것으로 나타났다.

Keywords : Waste landfill, Municipal waste, Particulate grouts, Differential settlement, Uniaxial

1. 서 론

현재 우리나라에는 사용이 종료된 매립지가 800여개소로 보고되고 있으며(환경관리공단, 1994) 이들에 대한 위치 및 폐기물 매립상태 등을 조사하여 매립지의 효율적인 사후관리 및 토지이용계획을 수립하려는 시도가 진행되고 있다(도갑수 외 6인, 1996). 이러한 토지 이용계획의 일환으로 사용종료된 쓰레기 매립지를 건설부지로 활용하려는 시도가 꾸준히 계속되고 있는데(한국지반공학회, 1995, 한국건설기술연구원, 1992), 예를 들어 1978년부터 1984년까지 6년간 매립후 사용종료된 서울 상계동 매립장의 경우 대한주택공사에 의하여 주거용지, 상업용지, 공공시설용지 등으로 1980년대 후반 개발되었고(대한주택공사, 1986), 경기도 안양·평촌매립장은 경기도 평촌 아파트 밀집지역 등 일부 도시쓰레기가 매립되었던 지역으로 농수산물 도매시장이 들어설 예정이며(한국토지개발공사, 1993), 대전시 갑천변에 1983년에서 1989년 사이 매립되었던 쓰레기 지반은 동다짐공법과 천층 시멘트계 약액처리로 지반특성을 개선한 후 갑천변 도시고속도로를 건설하였다(김만구, 1994).

본 논문은 강원도 삼척교동지구에 소재하는 쓰레기 매립장을 아파트 단지로 재활용하기 위한 조사연구의 일부로 쓰레기 매립지반의 건설부지로 활용시 발생하는 쓰레기의 지지력과 침하 등의 문제를 파악하기 위해 수행한 시추 및 시험굴조사, 동적 및 정적 콘관입시험 등 현장조사와 실내 다짐 및 강도시험결과를 분석하여 쓰레기 매립지반의 지반공학적 특성을 파악하고 침하량 분석을 통하여 각 지점별 침하량을 예측하였다. 그 결과 나타난 큰 침하

와 적은 지지력의 문제를 해결하기 위해 현탁액계(particulate grouts) 약액을 쓰레기에 혼합하여 만든 시료의 강도를 일축압축강도 시험을 통하여 알아보고, 유기물을 많이 포함하고 있는 매립쓰레기의 특성이 사용약액과 그 비율에 따라 어떻게 변화될 수 있는가를 분석하였다. 사용된 약액은 생석회, 보통포틀랜드시멘트, 슬래그시멘트, geocrete 시멘트의 4종류 이었다.

2. 현장개요

본 연구대상 쓰레기 매립장의 부지는 강원도 삼척시 교동일원으로 삼면이 산으로 둘러싸인 경사가 심한 계곡부에 위치하고 있다(그림 1). 1986년부터 1988년까지 약 3년동안 쓰레기를 단순투기한 비위생 단순매립장으로 침출수에 의한 토양이나 지하수의 오염을 차단하기 위한 차수막이나 집배수 시설이 되어있지 않고 매립종료 후 1.5m~4.5m 정도의 복토만이 수행된 곳이다.

본 매립지는 1993년 2회(BH-1*, BH-2*)에 걸쳐 시추조사를 실시하였으며, 1995년 5월 연구조사시 시추(BH-1~BH-5) 및 SPT 5회, 시굴조사(test pit) 9회, DCPT 5회를 실시하였고 쓰레기가 매립되어 있지 않은 복토층과 쓰레기가 매립되어 있는 복토층에서 평판재하시험을 6회 실시하였다. 이러한 현장조사로 부터 나타난 본 매립지의 계곡 중단부를 통한 그림 1의 단면 A-A'와 횡단부 단면 B-B'를 그림 2의 (a), (b)에 나타내었다.

그림 2(a)에서와 같이 본 매립지에 쓰레기가 매립된 지점은 하부사면의 철도가 지나가고 있는 지점으로 부터 약 60m 떨어진 계곡 상부의

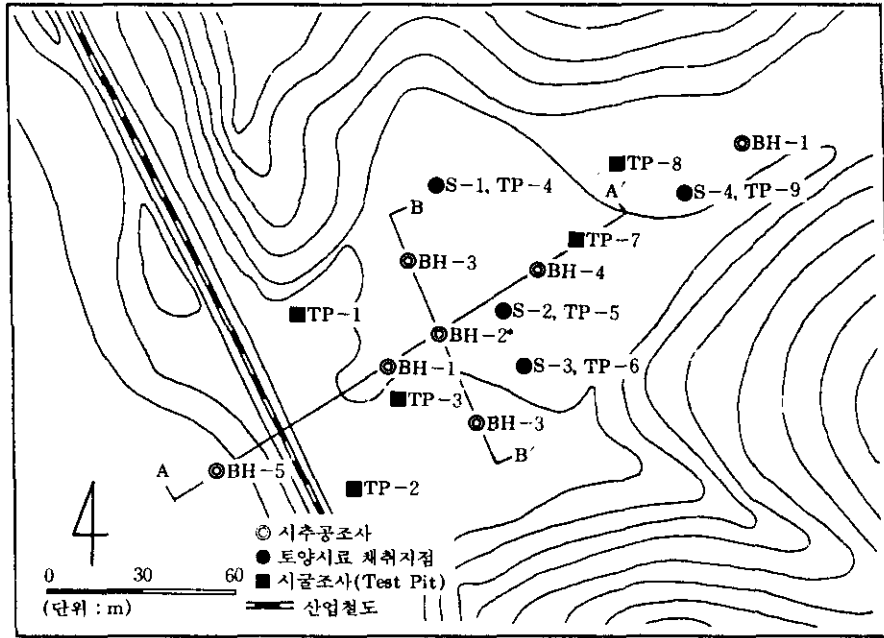


그림 1. 조사대상 매립지의 지형 및 현장조사위치도

시추공 BH-1*지점에서 시추공 BH-2*지점까지이며 그 두께는 4.5m~19.0m에 달한다. 그림 2(b)의 횡단면도에 의하면 쓰레기가 매립된 두께는 계곡중심부에서 두껍고 주변부로 갈수록 얇게 매립된 것을 알 수 있다. 매립쓰레기층 상부의 복토층의 두께는 1.5m~4.5m이었으며 매립지가 위치한 계곡상부의 복토층 두께는 얇고 계곡하부는 두꺼운편이었다. 매립 쓰레기층 하부지층은 풍화 잔류토층과 풍화암으로 구성되고 지하수위는 발견되지 않았다.

시추조사와 시험굴조사 결과로 부터 계산된

매립쓰레기양은 약 52000m³이었으며 매립이 진행된 순서는 초기 하부로 부터 상부로 매립이 되었고 이는 매립된 쓰레기의 부패안정화된 정도로 파악할 수 있었다. 매립된 쓰레기의 성상을 보면 표 1과 같다.

매립쓰레기의 성상에 의하면 연탄재와 토사류의 비율이 79%에 달하며 가연성으로 분류되는 음식물 쓰레기는 거의 없어 매립 완료 후 7~9년이 경과한 지금 분해 안정기에 들어간 것으로 추정되었다.

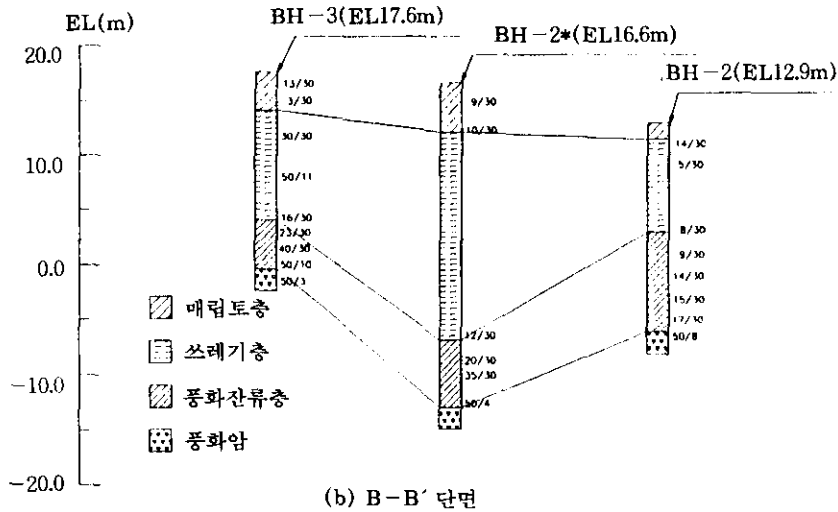
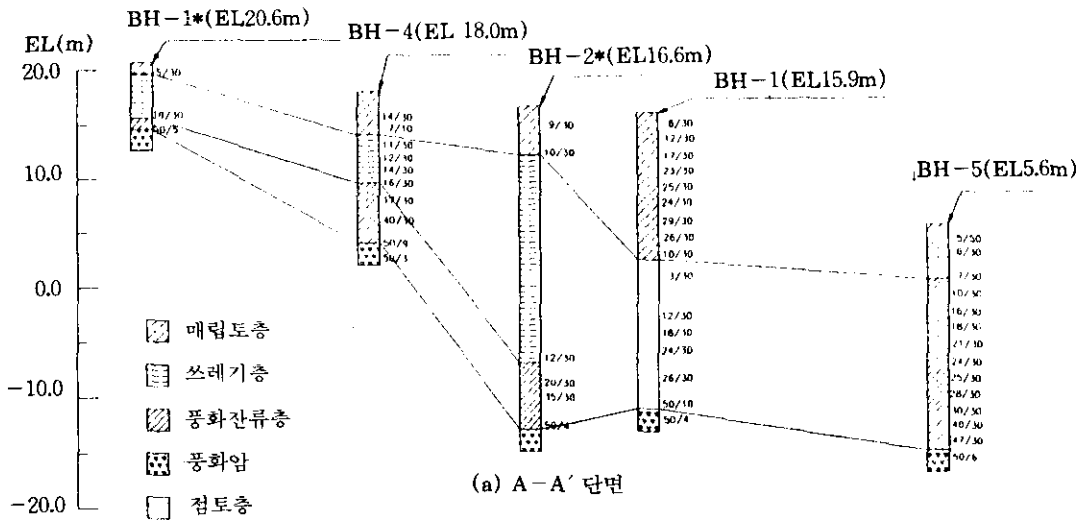


그림 2. 조사대상 매립지의 종단면(A-A')과 횡단면(B-B')을 통한 지층개요도

표 1. 삼척교동지구 쓰레기매립장 쓰레기의 성상

성분 위치	종류	가연성				소계 (%)	불연성				총계 (%)
		나무류	고무 피혁류	플라스틱 비닐류	기타		금속류	유리 초차류	연탄재 토사류	소계 (%)	
S-1		1.0	1.3	2.3	1.2	5.8	0.8	0.3	93.1	94.2	100
S-2		0.4	3.2	7.9	1.6	13.1	0.7	1.6	84.6	86.9	100
S-3		0.5	3.1	9.8	1.1	14.5	2.1	2.9	80.5	85.5	100
S-4		1.1	3.2	16.6	16.6	37.5	4.7	9.0	48.8	62.5	100
평균조성율(%)		0.7	2.7	8.6	4.2	16.2	1.8	3.0	79	83.8	100

각 지점별 조사시료는 47~83kg이고 표의 내용은 조성율을 의미한다.

3. 현장지반의 공학적특성

매립쓰레기에 대한 SPT시험결과 N=1로 부터 11cm 관입에 50회가 되는 단단한 지층까지 그 특성이 불균질함을 알 수 있었으며 측정지점별로 큰 편차를 보였다(그림 2(a), (b)참조).

현장매립복토와 쓰레기층에 대한 기본물성을 표 2에 나타내었는데 비균질성 매립물의 다양한 분포때문에 단위중량의 분산정도가 매우 크게 나타나고 있으며 복토층에 비하여 단위중량의 크기가 적은 것은 유기물과 연탄재의 함유량이 크기 때문인 것으로 사료된다. 쓰레기

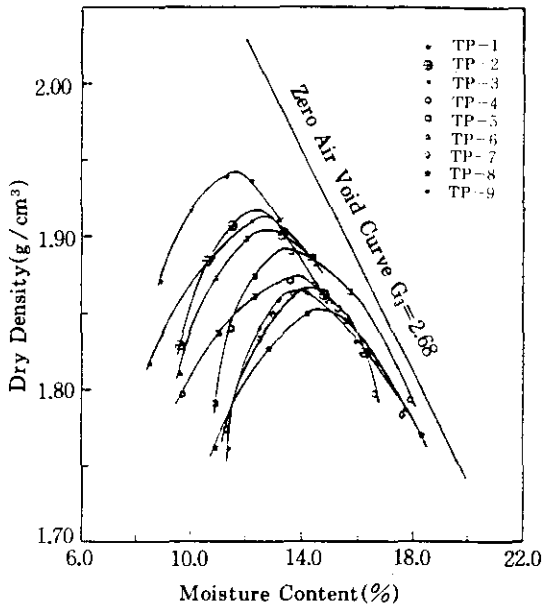
층 윗부분이 복토층에 비해 종이, 나무, 섬유류 등의 함수성이 큰 물질로 인하여 함수비가 크게 나타나며, 쓰레기층의 비중은 2.38~2.63의 범위로서 복토재의 비중 2.63~2.68보다 작게 나타났다. 입도분포는 쓰레기의 경우 균등계수 $C_u=42\sim 205$ 유효입경 $D_{10}=0.002\sim 0.008\text{mm}$ 의 범위로 양입도(well graded)이며 No. 200체를 통과하는 세립분은 33%미만으로 나타났다. 통일분류법에 의한 흙 분류결과 복토재와 쓰레기매립토 모두 SM으로 분류되었고, 액·소성 시험결과 모든 시료가 비소성(Non Plastic)이었다.

표 2. 복토층과 쓰레기매립층의 기본 물성

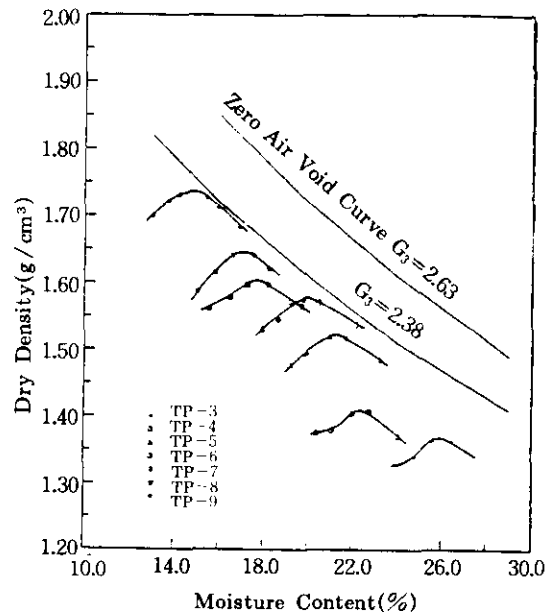
물성 토층분류	전체단위중량 (t/m^3)	함수비(%)	비중(G_s)	유효입경 D_{10}	#200체 통과량	균등계수(C_u)	통일분류
복토층	1.423~1.690	13.8~26.2	2.63~2.68	-	-	-	SM
쓰레기층	0.565~1.021	23.1~30.1	2.38~2.63	0.002~0.008	<33.2%	42~205	SM

다짐시험에 의한 다짐특성곡선을 그림 3에 나타내었는데 최대건조밀도(γ_{max})와 최적함수비(O.M.C.)의 범위는 복토층의 경우 1.85~

1.94 t/m^3 , 11.6~14.7%: 쓰레기층의 경우 1.37~1.74 t/m^3 , 14.7~26.0%이었다. 쓰레기 매립토의 경우 최대건조밀도는 복토재보다 작고



(a) 복토재



(b) 쓰레기 매립토

그림 3. 다짐특성곡선

최적함수비는 복토재보다 큰것으로 나타났는데 이는 쓰레기 매립토에 유기물 함량비가 높기 때문이며, 쓰레기 매립토의 경우 최대건조 밀도와 최적함수비의 범위가 복토재에 비해 비교적 넓게 나타났는데 이는 매립기간의 차이와 유기질의 부패정도에 관련이 있는 것으로 보인다. 유기질의 부패정도가 심한곳 즉, 매립기간이 오래된 곳에서의 다짐곡선은 그림 3(b)의 좌측 상향에 위치하고 부패정도가 덜한곳 즉, 매립기간이 짧은 곳은 다짐곡선의 우측 하부에 위치하는 것으로 나타났다.

복토층과 쓰레기층에 대한 직접전단시험결과 복토층의 경우 점착력(c)은 0.11~0.15kg/cm²으로 나타났고 전단저항각(Φ)의 값은 28.5~31.2°의 범위로 비교적 좁은 범위에 그 값들이 위치하고 있었다. 그러나 쓰레기층의

경우 점착력(c)은 0.03~0.14kg/cm²으로 나타났고 전단저항각(Φ)의 값은 매립층의 비균질성으로 인하여 19.3~40.0°로 그 범위가 매우 넓었다.

CBR몰드(직경 15cm)를 이용하여 쓰레기 매립지반에 대한 압축성을 평가하여 소형압밀 시험(직경 6.35cm)과 그 결과를 표 3에 나타내었다. 소형압밀시험결과 나타난 압축지수(C_c)는 CBR몰드를 이용한 경우보다 다소 작게 나타나는 경향을 보였고 이는 본 지반에 대한 침하해석에 이용되었다.

평판재하시험결과 쓰레기층을 포함하지 않는 지반의 허용지지력은 8t/m²정도이고 쓰레기 매립층을 포함한 지반에서의 허용지지력은 6.3t/m²로 측정되었다.

표 3. 소형 및 CBR몰드를 이용한 압밀시험결과

구분	직경 6.35cm 소형압밀시험기		CBR몰드를 이용하였을 때	
	TP-6	TP-9	TP-6	TP-9
e ₀	1.961	2.053	1.866	1.803
C _c	0.362	0.313	0.394	0.358
평균 C _v (m ² /day)	0.49		-	

4. 매립지반의 침하특성 분석

본 연구대상 매립지 같은 단순 투입형 매립지의 경우는 매립 당시 구분별한 매립 등으로 쓰레기 매립층의 두께가 일정하지 않고 매립물의 구성 또한 매우 다양하다. 이러한 원인으로 매립지반에 구조물 등의 하중이 작용한다면 쓰레기층의 두께와 매립되어 있는 쓰레기의 구성 성분에 따라 침하 양상도 서로 다르게 되어 결국에는 부동침하가 발생한다. 본 절에서는 쓰레기층의 두께에 따른 침하량을 압밀시험의 실험값으로부터 예측하고 또한 쓰레기 매립지에 대해 연구적용된 침하량 산정식을 이용하여 본 매립지의 침하량을 추정하였다.

4.1 매립지반의 침하이론

삼척교동지구 쓰레기 매립장의 매립연령은 약 8년으로 현재 부패에 의한 침하가 진행중이며 추가적인 상재하중 작용시 즉시침하와 압밀 침하가 부패침하와 함께 발생할 것으로 예상된다. 그러므로 본 연구대상 부지와 같은 쓰레기 매립지의 침하량은 상재 하중에 의한 즉시침하 및 압밀침하와 시간의 영향을 받는 부패에 의한 침하로 구분하고 이들 각각에 대해 계산하여 전체적인 침하량을 산정한다.

즉시침하량 산정식으로는 Osterberg가 제안한 식을 적용하였고, 압축침하량 산정식으로는 Terzaghi의 압밀침하량 산정식을 이용하였으며 그식은 다음과 같다.

$$s_i = 0.4 \frac{\sigma_0}{N} H \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad (1)$$

여기서, s_i : 즉시침하량
 σ_0 : 유효상재압력
 $\Delta\sigma_0$: 상재압력증가량
 N : 대상지반의 표준관입시험치

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad (2)$$

여기서, s_c : 압축침하량
 C_c : 압축지수
 e_0 : 초기간극비
 σ_0 : 유효상재압력
 $\Delta\sigma_0$: 상재압력증가량

쓰레기 매립지에서 유기물질등의 부패로 인하여 지반의 체적이 줄어들면서 발생하는 부패침하량 산정에는 Sowers방법(Sowers, G.F., 1973)과 Yen and Scanlon방법(Yen, B. C. and Scanlon, B., 1975)을 적용하였는데 이들 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

4.1.1 Sowers방법

본 방법은 점성토의 압밀침하량 공식중 2차 압밀을 추정하는 식과 비슷한 식을 사용하고 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$s = \frac{C_s}{1+e_0} H \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (3)$$

여기서, s : 쓰레기층의 부패침하량
 H : 쓰레기층의 초기 두께
 C_s : 2차 압축지수
 e_0 : 고려되어질 쓰레기층의 초기 간극비
 t_1 : 장기침하를 고려할때 시작시간
 t_2 : 장기침하를 고려할때 종료시간

여기에 이차압축지수 C_s 는 간극비의 함수로서 생화학적 부패와 관계가 있으며 급속분해의 경우 $C_s = 0.09e$, 완속분해의 경우 $C_s = 0.03e$ 를 사용한다. 급속분해란 쓰레기가 매립된 후 6개월에서 1년간의 기간동안 부패에 의한 분해가

왕성하고 현장의 부패조건 예를들어 쓰레기의 높은 함수량, 산소공급량, 온도, 쓰레기의 파쇄된 형태 등이 양호한 경우를 나타내며 완속분해란 쓰레기 매립장중 말기의 혐기성 분해형태로 분해작용이 매우 느려지거나 완료된 시기를 나타낸다. 식 3에서 사용된 2차 압축지수값과 간극비와의 관계를 그림 4에 나타내었다.

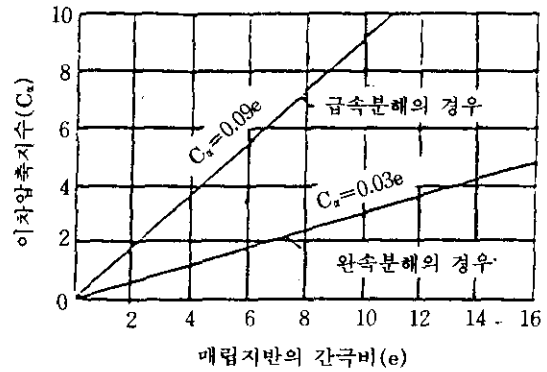


그림 4. 매립지반의 2차압축지수

4.1.2 Yen과 Scanlon방법

Yen과 Scanlon(1975)은 매립물의 부패에 의한 매립지반의 침하율을 측정하기 위하여 매립깊이 10~40m 범위인 4개의 매립장을 선정하여 매립이 완료된 후 9년 동안 매립지반의 침하량을 계측하여 그 결과를 이용하여 침하율을 예측하기 위한 경험식을 발표하였다. 해석에 있어서 매립기간을 고려하기 위하여 매립칼럼의 중간시기(median age of a fill column)라고 불리우는 수정기간과 침하율(m)의 상관관계를 이용하여 식을 제시하였으며 침하율(m)은 관측경과시간(개월)에 대한 관측높이의 변화의 비로 정의하였다.

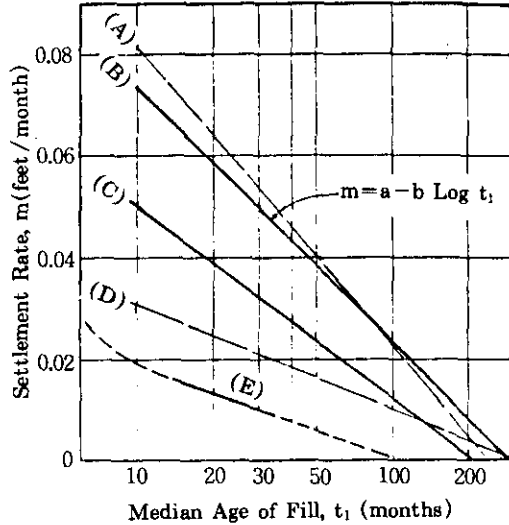
매립지에서 자중에 의한 부패 침하량을 산정하는 식은 식(2)와 같고 쓰레기 매립층의 두께에 따른 a , b , m 값의 계산은 그림 5, 그림 6과 같다.

$$s_c = \int_0^{t_1 + \Delta t} m dt = \int_0^{t_1 + \Delta t} (a - b \log t) dt \quad (4)$$

여기서, s_c : 부패 침하량(ft)

t_1 : 부패 침하량 계산시 매립지의
중간시기(month)

Δt : 부패 침하량 계산기간



- (A) $m = 0.142 - 0.060 \log t_1$
(100 feet $\leq H$, 70 $\leq t_c \leq 82$ 개월)
- (B) $m = 0.124 - 0.051 \log t_1$
(80 $\leq H \leq 100$ feet, 70 $\leq t_c \leq 82$ 개월)
- (C) $m = 0.088 - 0.038 \log t_1$
(40 $\leq H \leq 80$ feet, 70 $\leq t_c \leq 82$ 개월)
- (D) $m = 0.052 - 0.021 \log t_1$ ($H \leq 40$ feet, $t_c \leq 12$ 개월)
- (E) $m = 0.037 - 0.085 \log t_1$ ($H = 5$ feet)
- * A, B, C, D (Yen and Scanlon, 1975)
- E (Rao 등, 1977)

그림 5. 매립지 연령과 침하율과의 관계

침하율 m 은 부(-)의 값을 가지지 않는 기간 동안 까지만 부패침하가 발생한다고 보고 적용기간의 한계를 $t_1 + \Delta t \leq 10^{(a/b)}$ 와 같이 적용한다.

상기방법 외에도 쓰레기 매립지의 침하량 산정에 사용할 수 있는 식은 스프링 모델과 Das-hpot 모델을 직·병렬로 연결하여 쓰레기 매립지의 즉시침하와 시간경과에 따른 점진적 침하를 묘사한 Gibson and Lo 모델과 부패침하량을 시간에 대한 지수 형태로 나타내고 식에 필

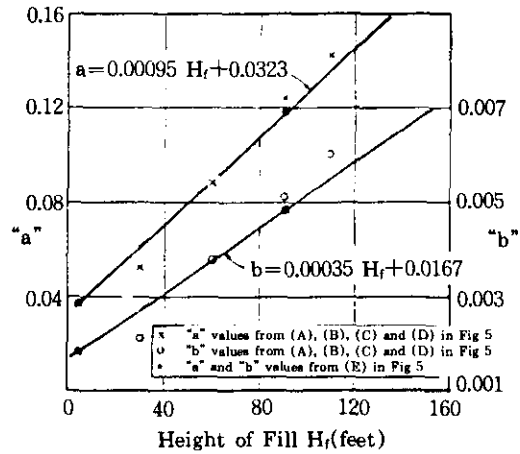


그림 6. 침하율 매개변수 a와 b

요한 지수값을 현장계측으로부터 구하는 Power Creep 법칙 등이 있으나 본 매립지 해석에는 사용하지 않았다.

4.2 매립지반의 침하량 비교

본 연구대상 쓰레기 매립장과 같이 느슨하게 매립이 되어 있는 경우에 매립지위에 구조물이 건설되게 될 경우 단기적으로는 즉시침하와 압축침하가 발생한다. 즉시침하량과 압축침하량 계산시 상재하중 증가량으로는 현장조사시점(1995년 5월)에서 10m의 성토(단위중량 = 1.6t/m³)와 5층 아파트 하중(고정하중 + 적재하중 = 1.38 × 5층 + 0.2 = 7.1t/m²)이 쓰레기 매립지반에 작용하는 것으로 보았다.

식(1)과 식(2)로 예측된 침하량은 표 4와 같은데 즉시침하의 경우와 압축침하의 경우 모두 쓰레기층의 조밀성과 관계가 있는 것으로 나타났다. BH-2와 BH-3를 비교하여보면 BH-2 지점의 경우 복토높이가 1.5m로 BH-3의 3.5m보다 작고 조밀한 정도는 N치로 볼때 BH-2 지점의 경우가 BH-3보다 느슨한 상태이므로 즉시침하량과 압축침하량이 큰 것으로 나타났다.

매립된 쓰레기의 부패로 인하여 발생하는 부패침하량을 Sowers 방법과 Yen and Scanlon 방

표 4. 시추조사 위치별 즉시침하량과 압축침하량

위치	쓰레기층의 두께(m)	복토높이(m)	평균 N치	즉시침하량(m)	압축침하량(m)
BH-2**	19	4.5	11	0.501	1.084
BH-2	8.5	1.5	5	0.370	0.762
BH-3	10	3.5	21	0.119	0.694
BH-4	5.5	4.0	12	0.105	0.349

* 매립지 현장조사시간 기준(1995년)

**93년 시추지점

법을 이용하여 경과기간별로 표 5에 나타내었다.

Sowers방법에서 2차압축지수는 본 매립지에서 수행한 가스발생량 실측결과와 현장관찰로부터 급속분해와 완속분해의 중간값인 $C_0=0.06e$ 값을 적용하였다. 가스발생량 조사결과 매립장 전지역에 걸쳐 CH_4 의 농도가 평균 36.2%, CO_2 가 35.3%로 발생하는 것으로 나타나 가스발생량으로만 볼 때 본 매립장은 혐기성 안정기에 들어있는 것으로 나타났으나, 쓰레기의 현장상태는 부분적으로 부패가 거의 발생되지 않은 지역이 발견되었고, 쓰레기층의 매립심도에 따라 그 부패정도의 편차가 심한 것으로 나타났다. 이는 쓰레기 매립종료직후 실시된 상부의 복토(두께 1.5~4.5m)로 인하여 쓰레기의 부패에 필요한 충분한 양의 수분이 공급되지 않은 것으로 판단되어 Sowers방법에서의 이차압축지수(C_0)값은 급속분해시의 0.09e값과 완속분해시의 0.03e의 값의 중간값인 0.06e값을 적용하였다. 초기간극비(e)는 모래치환법을 이용하여 구한 단위중량과 함수비로부터

더 유출한 평균값인 1.961을 적용하였고, 부패침하량 산정시 장기침하를 고려할 때 시작시간 t_0 은 매립종료후 현재까지의 기간인 7년, 장기침하를 고려할 때 종료시간 t_2 는 현재(1995년 현재)이후 경과기간별로 그 값을 결정하였다.

Yen and Scanlon방법의 적용은 각각의 쓰레기 매립층 두께(H_i)를 이용 그림 6에 나타난 a식($a=0.00095H_i+0.0323$)과 b식($b=0.00035H_i+0.0167$)의 값을 적용하였다. 본 매립지의 경우는 현장조사시점인 1995년 이후의 경과기간별 부패침하량의 양상을 파악하고자 하였기 때문에 부패침하량 계산시 필요한 매립지의 중간시기(t_1)는 매립초기로부터 현장조사시점까지 9년에서 매립기간 3년의 중간시기 기간을 제외한 90개월로 하였고, 1995년 이후에 대하여 경과기간별로 부패침하량의 양상을 계산하였다.

상기 두가지 방법으로 예측한 부패침하량의 경향은 다음과 같다. 쓰레기 매립층의 두께가 비교적 두꺼운 BH-2**(19m), BH-3(10m)의 경우는 Yen and Scanlon방법으로 추정된 부패침하량이 Sowers방법에 의해 예측된 부패침하

표 5. 경과기간에 따른 부패침하량

위치	쓰레기층 두께 (m)	*경과기간에 따라 추정되는 부패 침하량(m) (Sowers/Yen and Scanlon)				
		1yr	2yr	3yr	4yr	5yr
BH-2**	19	0.044/0.055	0.083/0.103	0.117/0.145	0.149/0.182	0.177/0.212
BH-2	8.5	0.020/0.023	0.037/0.041	0.052/0.055	0.066/0.065	0.079/0.071
BH-3	10	0.023/0.028	0.043/0.051	0.062/0.069	0.078/0.083	0.093/0.093
BH-4	5.5	0.013/0.014	0.024/0.024	0.034/0.030	0.043/0.033	0.051/0.033

* 매립지 현장조사시간 기준(1995년 5월)

**93년 시추지점

량보다 비교적 크게 나타났고, 쓰레기 매립층의 두께가 8.5m인 BH-2의 경우는 초기에는 Yen and Scanlon방법에 의해 예측된 부패침하량이 크나 현재시점으로부터 경과기간 4년을 고비로 Sowers방법에 의한 부패침하량이 커지는 경향을 나타내었다. 쓰레기 매립층의 두께가 5.5m인 BH-4 지점의 경우는 초기에는 유사한 경향을 보이나 2년이 경과한 후부터 Sowers방법으로 예측된 부패침하량이 커지는 경향을 보였다.

즉시침하량과 압축침하량에 Sowers방법과 Yen and Scanlon방법으로 각각 구한 부패침하량을 합산하여 구한 침하량을 표 6에 비교하여 나타내었다. 표 6에서 알 수 있듯이 1년후에 예상되는 전체침하량은 쓰레기층 두께가 19m인 경우 163.5cm로 부터 쓰레기층의 두께 5.5m인 경우 46.8cm까지 다양한 분포를 보이고 있어 쓰레기 매립지반을 개량하지 않고 기초지반으

표 6. 경과기간에 따른 침하량

위치	쓰레기층 두께 (m)	*경과기간에 따라 추정되는 즉시 침하량+압축 침하량+부패 침하량(m) (Sowers/ Yen and Scanlon)				
		1yr	2yr	3yr	4yr	5yr
BH-2**	19	1.629/1.640	1.668/1.688	1.702/1.729	1.734/1.767	1.761/1.797
BH-2	8.5	1.152/1.155	1.169/1.173	1.184/1.187	1.198/1.197	1.211/1.203
BH-3	10	0.836/0.841	0.856/0.864	0.875/0.882	0.891/0.896	0.906/0.906
BH-4	5.5	0.467/0.468	0.478/0.478	0.488/0.484	0.497/0.487	0.505/0.484

* 매립지 현장조사시간 기준(1995년 5월)

** 93년 시추지점

5. 현탁액 약액이 혼합된 매립쓰레기의 강도시험

쓰레기 매립지반을 택지로 재활용하기 위해 지반의 침하를 줄이고 지지력을 증진시켜야할 목적으로 개량심도의 조절이 가능하고 대상지반의 개량시 강도조절이 비교적 용이한 고결(그라우팅)공법의 적용이 가능하다. 본 쓰레기 매립지반에 대한 개량을 위하여 개량재로 현재 많이 사용되고 있거나 새롭게 개발된 종류의

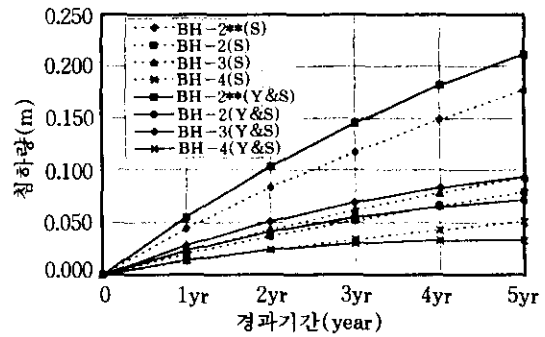


그림 7. Sowers 방법(S)과 Yen and Scanlon 방법(Y&S)을 이용하여 구한 지점별 부패침하량의 비교

로 사용할 경우 최대 116.7cm의 부등침하를 예상할 수 있으며 5년후에는 최대 127.5cm의 부등침하가 발생할 수 있는것으로 나타났다. 결과적으로 부패가 완료되기 전까지는 시간이 경과할수록 부등침하가 더욱 커짐을 알 수 있었다.

고화재나 팽창재의 적용성을 검토하기 위하여 생석회, 보통시멘트, 슬래그시멘트, Geocrete시멘트 등을 이용하여 양생일에 따른 적정 혼합비 및 사용수량을 변화시켜 일축압축강도시험을 실시하였다. 시험에서 개량재와 혼합한 쓰레기 매립토는 공시체 제작시 #4체로 걸러서 이용했으며 비닐, 마대, 종이 등의 생활쓰레기는 잘라서 혼합하였고, 공시체의 습윤단위중량은 $1.6 \geq 0.05t/m^3$ 이었고, 양생조건은 15℃, 80%의 항온항습을 유지하였으며 표 7에는 본

표 7. 시멘트의 화학성분 및 물리적특징

종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	비중	Blaine (cm ² /g)	화학적항성 (SRV*)
보통시멘트	20.4	5.8	3.1	62.6	3.6	0.13	0.77	1.9	3.15	3200	57%
슬래그시멘트	24.6	9.8	2.4	51.3	4.1	0.18	0.65	2.3	3.11	3880	34%
Geocrete	25.1	10.4	2.1	52.9	4.3	0.16	0.60	3.7	3.05	6140	27%

* SRV : Sulfate resistance Value = $\frac{0.054 - \text{용액중의 SO}_3(\text{g})}{0.054} \times 100(\%)$

- SRV < 50 : 충분한 내구성 보장
- 50 < SRV < 60 : 시공법에 따라 내구성 기대
- SRV > 65 : 내황산염성이 없기 때문에 붕괴우려

실험에 사용된 시멘트 재료의 성분 및 특징을 나타내었다.

5.1 생석회

생석회를 이용한 지반의 안정처리의 효과는 생석회 자체의 수화작용, 수화열, 토립자의 응집·난립화작용, 모관흡수작용 등으로 일반적으로 대상지반의 함수비 저하와 작업성 향상 등의 효과가 있다.

쓰레기 매립토와 생석회와의 혼합처리 특성

에 대한 시험을 실시하였는데 시험방법은 쓰레기 매립토에 대한 중량비로 생석회 10%, 20%, 30%와 물 30%, 40%, 50%의 비로 공시체를 제작하여 3일, 7일, 28일의 일축압축강도를 구하여 그림 8에 비교하였다.

시험결과 쓰레기:생석회:물의 중량비 100:10:40에서 최대 강도를 나타내었으며 전체적인 경향은 생석회의 중량비가 커질수록 그리고 양생기간이 길어질수록 전반적인 강도가 증가하였다. 사용비율별로 분류하면 사용수량 40% 일때의 강도가 대체로 높은 것으로 나타났다.

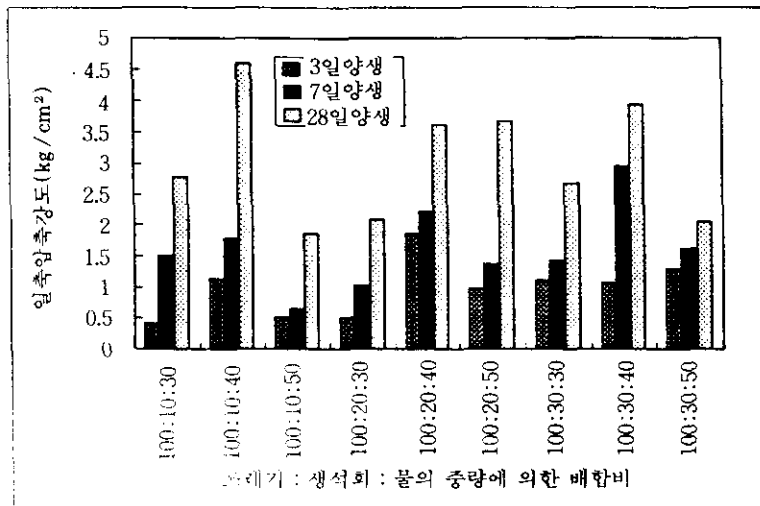


그림 8. 생석회를 혼합한 쓰레기의 양생일·혼합비에 따른 일축압축강도 비교

5.2 보통시멘트

유해 폐기물의 안정처리에 시멘트를 이용하면 시멘트의 복잡한 수화과정과 다양한 수화 생성물, 다공질의 미세구조에 의해 물리·화학적 반응을 일으켜 유해 폐기물을 안정화·고형화시킬 수 있다. 폐기물 자체에 함유되어 있는 물도 시멘트와 반응하여 수화 생성물을 형성하

기도 하는 등 폐기물의 성질에 따라 적절한 배합비와 물/시멘트 비를 조절하면 충분한 효과를 얻을 수 있다.

쓰레기 매립지반과 보통시멘트에 의한 혼합처리시험은 매립토와 매립토+생활쓰레기로 나누어 물:시멘트를 1:1, 5:1로 변화시켜 시험을 행하였다(표 7).

표 8. 시멘트의 혼합처리토의 일축압축강도

시료	W/C (물:시멘트비)	일축압축강도(kg/cm ²)					
		1일	3일	7일	14일	21일	28일
매립토($\gamma_s=1.773\text{g/cm}^3$)	1 : 1	9.16	18.03	46.94	57.81	74.23	78.43
매립토+생활쓰레기 ($\gamma_s=1.668\text{g/cm}^3$)	5 : 1	10.68	21.39	21.01	22.54	25.21	26.23

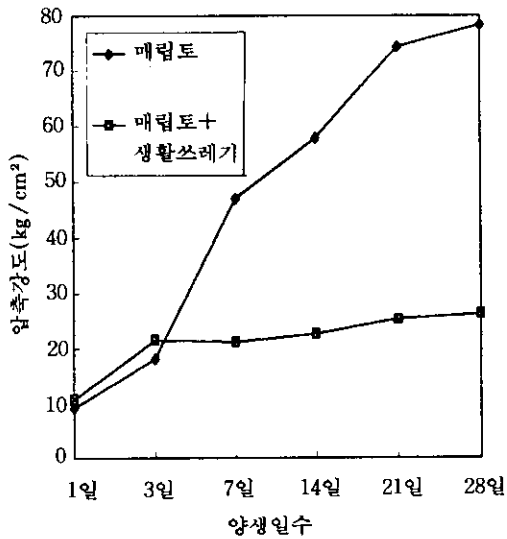


그림 9. 매립토, 매립토 생활쓰레기 혼합물에 시멘트를 혼합하였을 때 양생일수에 따른 일축압축강도의 변화

보통시멘트는 연약지반을 처리하기 위한 고화재로서 가장 일반적으로 사용되어지고 있지만 그림 9의 시험결과에서 나타나듯이 매립토에 시멘트를 혼합하였을 때에는 시간이 경과하면서 강도증대효과가 커지는데 비하여 매립토

와 생활쓰레기를 시멘트와 혼합하였을 때에는 경과시간에 따른 강도증대효과는 전자에 비해 현저히 떨어짐을 알 수 있었으며 그 이유는 쓰레기의 비균질한 성분과 유기물함량이 많기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 28일 강도를 비교하여 볼 때 생석회를 혼합할때보다는 4배 이상의 높은 강도를 보이는 것으로 나타나고 있다.

5.3 슬래그시멘트

일반시멘트에 비해 반응성이 우수하며 분말도가 높고 초기강도가 뛰어난 슬래그시멘트를 쓰레기 매립지반과 혼합하여 일축압축강도를 시험하였다.

시험결과 슬래그 시멘트의 경우 시멘트 중량비 15%와 사용수량 20%와 30%에서 우수한 강도를 얻을 수 있었으며 생석회나 보통시멘트를 혼합하였을때에 비교하여 높은 강도를 나타내는 것을 알 수 있다.

5.4 Geocrete시멘트

일반적인 혼합처리 공법은 쓰레기 매립층과

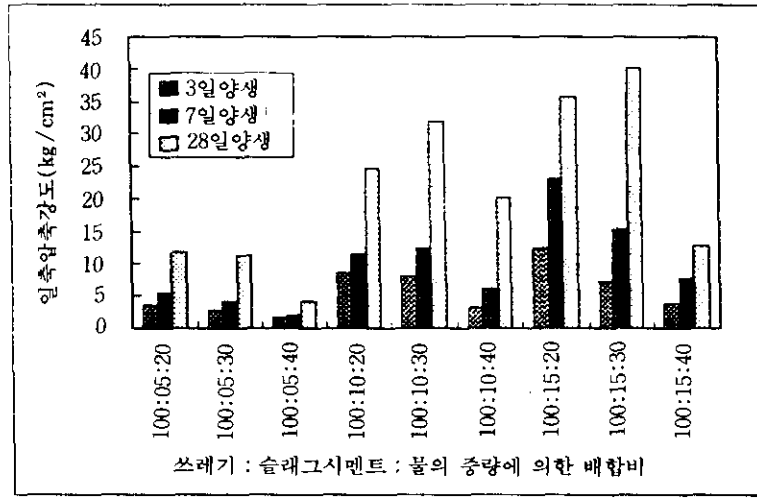


그림 10. 슬래그시멘트를 혼합한 쓰레기의 양생일·혼합비에 따른 일축압축강도의 비교

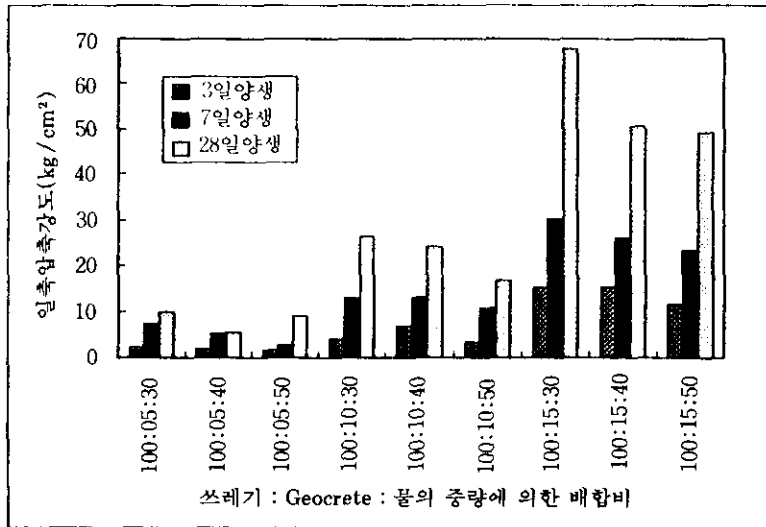


그림 11. Geocrete 시멘트를 혼합한 쓰레기의 양생일·혼합비에 따른 일축압축강도 비교

같은 유기물 함량이 많은 지반에서는 그 효과가 많이 감소하는 경향이 있다. 이는 쓰레기층에 포함되어 있는 여러 유기물의 작용으로 시멘트 수화물이 팽창 파괴되기 때문이다. 그러므로 혼합처리의 효과를 얻기 위해 내화화성파 강도발현성이 우수한 특수시멘트를 주입재로 이용하는 것이 유리하다. Geocrete시멘트는 중

금속 및 각종 염류에 대한 내화화성이 우수하고 각종 유기물로 인한 경화지연 현상을 억제하는 등의 장점이 있다(천 등, 1995).

쓰레기 매립토에 대한 Geocrete시멘트는 중량비로 5%, 10%, 15%, 사용수량은 30%, 40%, 50%로 항온항습을 유지한 상태에서 일축압축강도 시험을 수행하였고 그림 11에 그 결과를

나타내었다.

그 결과 Geocrete시멘트 처리토의 경우 쓰레기에 대한 중량비가 15%일 때 28일 강도 70kg/cm²을 나타내어 생석회나 보통시멘트, 슬래그시멘트에 비하여 매우 우수한 강도를 나타냄을 알 수 있었다. 경제성 면에서는 시멘트에 비해 떨어지나 구조물 시공에 필요한 소요

강도를 얻기에는 적절한 주입재라 판단된다.

5.5 고결(그라우팅)공법의 비교 및 고찰

앞에서 언급했던 4가지 고화재들에 대한 시험결과중 가장 강도가 우수한 배합비에 대하여 서로 비교하여 그림 12에 제시하였다.

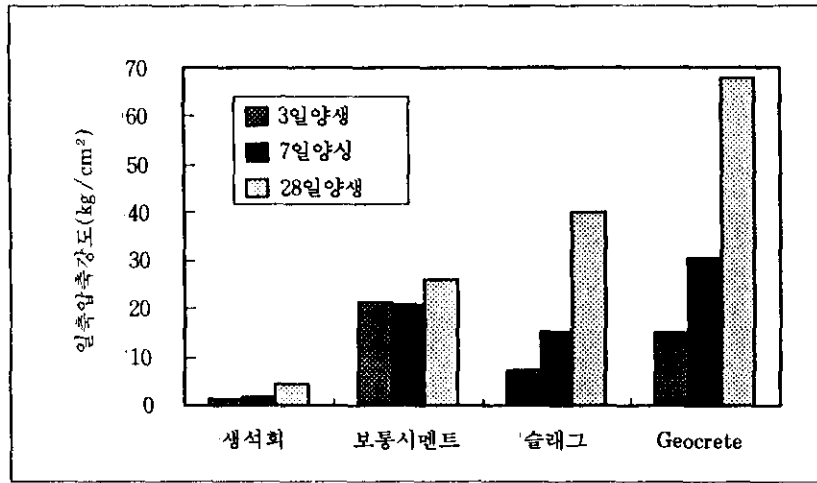


그림 12. 강도가 가장 우수한 배합비에 대한 고화재 종류별 양생일에 따른 일축압축강도의 비교

생석회 혼합처리토의 강도는 다른 고화재에 비하여 현저히 떨어져 본 지반이 택지조성을 위한 지반이므로 구조물의 기초로서 그 기능을 하기에는 부적합하다고 판단되며 보통포틀랜드시멘트의 경우 시험 대상토를 일반 매립토와 쓰레기가 섞인 매립토를 비교하여 시험을 수행한 결과 매립토의 28일 강도가 78.4kg/cm²으로 비교적 높은 수치를 보인 반면에 쓰레기와 매립토가 섞인 지반에 대해서는 28일 강도가 불과 26.23kg/cm²에 지나지 않아 쓰레기에 의한 강도 감소효과가 현저함을 알 수 있다.

슬래그시멘트의 경우는 7일강도까지는 보통시멘트에 비해 강도가 떨어지나(3일강도 7.35 : 21.39kg/cm², 7일강도 15.3 : 21.01kg/cm²) 28일 강도는 보통시멘트보다 약 14kg/cm²정

도 더 우수함을 알 수 있어 슬래그시멘트의 쓰레기 매립지반에의 적용성이 일반시멘트에 비해서 우수함을 알 수 있었고 Geocrete시멘트는 유기물이나 염분과의 반응성을 높인 지반 보강용 시멘트로서 쓰레기에 혼합한 시료의 28일 강도가 일반 매립토와 보통시멘트의 28일 강도인 78.4kg/cm²에 뒤지지 않는 67.81kg/cm²으로 측정되어 상기의 4가지 고화재 가운데 쓰레기 매립지반에의 적용성이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

실험결과와 같이 Geocrete시멘트는 비표면적과 화학저항성이 다른 시멘트에 비해 우수하고 장기강도발현에도 우수한 화학조성을 가지고 있으나 가격면에서 보통시멘트에 비하여 약 1.5배~2배정도 비싼것으로 나타나고 있다. 따

라서 실제 고결(grouting)공법 적용시에는 각 재료 사용에 따른 경제성 분석을 병행하여 고화재를 선정하여야 한다.

6. 결 론

본 연구는 사용종료 쓰레기 매립장을 주택지로 재활용하고자 지반공학적인 현장조사와 실내시험, 침하량분석 등을 실시하고, 지지력을 확보하기 위해 현탁약액 주입시험 등을 실시한 것으로서 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같이 결론지을 수 있다.

- (1) 본 연구대상 쓰레기 매립지반은 지반공학적으로 연탄재가 많아 느슨한 상태의 실트질 모래로 분류되고 유기질 함량이 클수록 다짐이 잘 안되고 함수비가 높은 특성을 가지고 있다. 즉 비교적 매립기간이 길었던 지점의 경우 다짐이 잘되거나 그와 반대로 매립기간이 짧아 유기질함량이 큰 지점은 최대건조밀도가 작고 최적함수비가 큰것으로 나타났다.
- (2) 본 매립지반의 침하량 분석결과 쓰레기 매립지점에 따라 쓰레기층 두께의 차이가 커서 쓰레기 매립지반을 개량하지 않고 기초지반으로 사용할 시에는 향후 5년동안의 경우는 최대 1.3m의 부등침하가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 본 매립지반의 침하량 저감과 지지력 증진을 위한 대책공법으로서 고결공법의 적용성을 검토한 결과, 슬래그시멘트와 Geocrete시멘트가 생석회나 보통포틀랜드시멘트에 비교하여 효과가 큰 것으로 나타났다. 특히 내화확성이 크고 유기질 토양과의 반응효과를 높일 목적으로 제조된 Geocrete시멘트를 현장에서 채취한 쓰레기와 혼합하여 제작한 공시체의 압축강도는 매립복토재에 보통시멘트를 혼합하였을 때의 압축강도에 비해서도 손색이 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1995년 한국토지공사의 연구비 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 본 연구에 적극 협조해준 한국토지공사 및 영동지사 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김만구(1994), "폐기물 매립지반의 건설부지활용을 위한 등다짐공법의 적용평가", 석사학위논문; 대전대학교 산업대학원, pp.1~2.
2. 도갑수의 6인(1996), "사용종료 폐기물 매립지의 실태조사", (사)한국폐기물학회 매립처분분과 '96년 폐기물매립기술 심포지움, pp.249~254.
3. 대한주택공사(1986), "서울상계지구 연약지반 개량방안 용역보고서", pp.5~6.
4. 천병식의 4인(1995), "Geocrete시멘트 그라우팅에 의한 연약지반 보강효과 증대", 대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집(Ⅲ), pp.505~508.
5. 한국건설기술연구원(1992), "도시폐기물 매립장의 건설부지활용과 위성매립시스템에 관한 연구", 건기연 92-GE-112, pp.1~3.
6. 한국지반공학회(1995), "삼척교동지구 택지개발 쓰레기처리용역연구", 보고서 pp.31~33.
7. 한국토지개발공사(1993), "안양·평촌지구 매립쓰레기에 관한 연구", pp.11~12.
8. 환경관리공단(1994), "폐기물 매립시설 유지관리 실무"
9. Rao, S. K. Moulton, L. K. Seals, R. K. (1977), "Settlement of Refuse Landfills", Proceedings, ASCE Geotech. Engrg. Div. Speciality Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material, pp.578~598.
10. Sowers, G. F.(1973), "Settlement of Waste Disposal Fills", Proceedings, The 8th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.2.2, pp.207~210.
11. Yen, B. C. and Scanlon, B.(1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT5, pp.475~487.

(접수일자 1996. 5. 10)